

Peter Zeller (Hrsg.)

Handbuch Fahrzeugakustik

**Handbuch Verbrennungsmotor**

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

**Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik**

herausgegeben von H.-H. Braess und U. Seiffert

**Automobildesign und Technik**

herausgegeben von H.-H. Braess und U. Seiffert

**Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik**

von H. Eichlseder und M. Klell

**Mensch und Fahrzeug**

von E. Fiala

**Umweltschutz in der Automobilindustrie**

von D. Gruden

**Fahrwerkhandbuch**

herausgegeben von B. Heißing und M. Ersoy

**Aerodynamik des Automobils**

herausgegeben von W.-H. Hucho

**Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen**

von F. Kramer

**Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung**

von G. Leister

**Automobilelektronik**

herausgegeben von K. Reif

**Automotive Software Engineering**

von J. Schäuuffele und T. Zurawka

**Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz**

herausgegeben von U. Seiffert und G. Rainer

**Rennwagentechnik**

von M. Trzesniowski

**Handbuch Kraftfahrzeugelektronik**

herausgegeben von H. Wallentowitz und K. Reif

**Strategien in der Automobilindustrie**

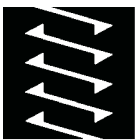
von H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven und I. Olschewski

Peter Zeller (Hrsg.)

# Handbuch Fahrzeugakustik

Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch  
Mit 633 Abbildungen und 43 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



**VIEWEG+**  
**TEUBNER**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über  
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

1. Auflage 2009

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Lektorat: Ewald Schmitt | Gabriele McLemore

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.viewegteubner.de](http://www.viewegteubner.de)



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg  
Satz: Druckhaus Thomas Müntzer, Bad Langensalza  
Druck und buchbinderische Verarbeitung: Krips b.v., Meppel  
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.  
Printed in the Netherlands

ISBN 978-3-8348-0651-2

# Vorwort

---

Die Handbücher in der Reihe Kraftfahrzeugtechnik von Vieweg+Teubner stellen mittlerweile eine umfassende und anerkannte Bibliothek des fahrzeugtechnischen Wissens dar. Gerne bin ich deshalb der Bitte des Verlages gefolgt, eine noch verbliebene Lücke innerhalb der Fachbuchreihe mit dem vorliegenden Handbuch Kraftfahrzeugakustik zu schließen. Die Aufgabe erschien mir umso reizvoller, als mir durch meine langjährige Tätigkeit in der Fahrzeugentwicklung die Lücke zwischen der fahrzeugtechnischen Literatur, welche die Akustik und Schwingungstechnik nur am Rande behandelt und der akustischen Literatur, welche wiederum die Besonderheiten der Fahrzeugtechnik nicht weiter vertieft, immer wieder aufgefallen ist. Mit dem vorliegenden Buch wird deshalb sowohl den angehenden Ingenieuren, welche sich näher mit den akustischen und schwingungstechnischen Fragestellungen rund ums Automobil beschäftigen wollen, als auch den bereits in der Fahrzeugindustrie tätigen Akustikern und Schwingungstechnikern ein Compendium geliefert, welches die Vibroakustik des Automobils zum zentralen Gegenstand hat.

Bei der Entwicklung eines Automobils tritt das Fachgebiet Akustik und Schwingungstechnik in unterschiedlichsten Ausprägungen in Erscheinung. Das Spektrum reicht von der Beseitigung lästiger Störgeräusche bis zur Mitgestaltung des Fahrzeugcharakters durch einen attraktiven Motorsound. Typisch ist dabei der Sachverhalt, dass nahezu alle Komponenten und Systeme des Fahrzeugs für die Vibroakustik relevant sein können, diese aber nur in wenigen Fällen die Primärfunktion des Bauteils darstellt. Gleichzeitig machen der wettbewerbsbedingt steigende Kostendruck sowie der durch die Klimaerwärmung (CO<sub>2</sub>-Emissionen) erneut forcierte Fahrzeugleichtbau die gleichzeitige Erfüllung aller funktionalen Anforderungen immer schwieriger. Insofern gehört zur erfolgreichen Arbeit des Akustikingenieurs nicht nur die Fachkompetenz für innovative Lösungsansätze, sondern auch die Fähigkeit, Wirkzusammenhänge aufzeigen und damit das notwendige Verständnis für die Belange der Vibroakustik wecken zu können. Bei der Themenauswahl für dieses Buch wurde auch aus diesem Grund ein besonderes Augenmerk auf die Verbindung zwischen den theoretischen Grundlagen der Akustik und Schwingungstechnik und den vielfältigen Problemstellungen im Rahmen der Automobilentwicklung gelegt. Da nach meiner Erfahrung im Spannungsfeld zwischen dem intensiven Einsatz numerischer Rechenverfahren auf der einen Seite und der rein empirisch angelegten Versuchsarbeit auf der anderen Seite die Physik hinter den bearbeiteten Fragestellungen manchmal in den Hintergrund rückt, sollten im vorliegenden Buch die wesentlichen physikalischen Wirkzusammenhänge herausgestellt werden.

Um Breite und Tiefe des Fachgebietes angemessen abzudecken, war die Mitarbeit kompetenter Experten aus Industrie und Hochschule an diesem Buch essentiell. Neben den Autoren, welche einen eigenständigen Teil zu der Publikation beigesteuert haben und auch namentlich für diese Kapitel zeichnen, möchte ich an dieser Stelle speziell auch diejenigen Mitarbeiter der BMW AG hervorheben, welche zum Gelingen des Werkes durch Diskussion und Sachbeiträge ebenfalls unschätzbare Hilfe geleistet haben. Insbesondere sind hier zu nennen Dr. Arnaud Bocquillet und Albert Kaltenhauser (Passivakustik), Dr. Fabian Evert (ANC), Dr. Herbert Finsterhölzl (Außengeräusch), Dr. Peter Kirchknopf und Andreas Raith (Schwingungstechnik), Dr. Stefan Sentpali (Mechatronik), Rafael Stryczek (Akustikberechnung), Frank Ullrich (Aeroakustik), Dr. Alfred Zeitler (Sounddesign). Allen diesen Personen sowie auch den Mitarbeitern des Verlages gilt mein besonderer Dank für ihre Unterstützung beim Entstehen des vorliegenden Buches.

München, im Februar 2009

Peter Zeller

# Autorenverzeichnis

---

Dipl.-Ing. Andreas Enderich  
[10.1]

Mahle Filtersysteme GmbH

Prof. Dr.-Ing. Hugo Fastl  
[14.3]

Technische Universität München

Dipl.-Ing. (FH) Josef Hobelsberger  
[17]

Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH

Dr. Rolf Jebasinski  
[10.2]

J. Eberspächer GmbH & Co. KG

Dr.-Ing. Stefan Kerber  
[14.3]

Technische Universität München (vormals)

dr. ir. Dennis de Klerk  
[15.7]

Müller-BBM VibroAkustik Systeme B.V.

Dipl.-Ing. Tobias Moosmayr  
[13]

BMW Group

Dr.-Ing. Ernst-Ulrich Saemann  
[11]

Continental AG

Prof. Dr.-Ing. Peter Zeller  
[1–9, 12, 14.1, 14.2, 15.1–15.6, 16, 18]

Technische Universität München

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Automobil und Gesellschaft	1
1.2	Trends in der Automobilakustik	2
<b>2</b>	<b>Allgemeine Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Prozess Akustikentwicklung	4
2.1.1	Zielfindung	4
2.1.2	Subjektive Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften	5
2.1.3	Geräuschmetrik	6
2.1.4	Funktionsorientierung	8
2.2	Modelle und Begriffe	9
2.2.1	Modellbildung	9
2.2.2	Elektromechanische Analogie	12
2.2.3	Beispiel Einmassenschwinger	13
2.2.4	Elektroakustische Analogie	15
2.2.5	Vierpoltheorie	15
<b>3</b>	<b>Schwingungstechnik</b>	<b>19</b>
3.1	Freie Schwingungen elementarer Systeme	19
3.1.1	Einmassenschwinger	19
3.1.2	Ungefesselter Zweimassenschwinger	21
3.1.3	Gekoppelte Schwingsysteme	21
3.2	Erzwungene Schwingungen elementarer Systeme	23
3.2.1	Einmassenschwinger	23
3.2.2	Zweimassenschwinger	24
3.3	Passive Schwingungsauslegung	25
3.3.1	Elastische Lagerung	27
3.3.2	Isolationsbauteile	29
3.3.3	Schwingungsdämpfung	31
3.3.4	Dämpfungsbauteile	32
3.3.5	Systemdämpfung	34
3.3.6	Schwingungstilger	36
3.3.7	Fliehkraftpendel	39
3.4	Aktive Schwingungskompensation	41
3.4.1	Funktionsprinzip	41
3.4.2	Aktive Lagerung	43
3.4.3	Trägheitsmassenaktuator	44
3.5	Subjektives Schwingungsempfinden	46
<b>4</b>	<b>Schwingungsphänomene im Kraftfahrzeug</b>	<b>49</b>
4.1	Fahrbahnerregte Schwingungen	50
4.1.1	Vertikaldynamik	51
4.1.2	Stochastische Unebenheitsanregung realer Fahrbahnen	57
4.1.3	Beurteilung stochastischer Fahrbahn-Anregungen	59
4.1.4	Konflikt Fahrkomfort vs. Fahrsicherheit	60
4.1.5	Aktive Fahrwerke	61
4.1.6	Sitzschwingungen	62
4.1.7	Fahrzeugnicken, Einspurmodell	65
4.1.8	Wanken, Zweispurmodell	67
4.1.9	Karosseriezittern	68
4.1.10	Motorstuckern	73
4.2	Raderregte Schwingungen	75
4.2.1	Ungleichförmigkeitsanregung	75

4.2.2	Anfahr- und Bremsstempeln .....	76
4.3	Motorerregte Schwingungen .....	77
4.3.1	Leerlaufschwingungen .....	77
4.3.2	Lastwechselschwingungen .....	78
4.4	Strukturdynamik .....	81
4.4.1	Globale Karosserieeigenformen .....	81
4.4.2	Funktionsmodell Karosserie .....	83
4.4.3	Karosserieunterzüge .....	84
<b>5</b>	<b>Luftschall</b> .....	86
5.1	Begriffe .....	86
5.2	Entstehung und Ausbreitung .....	87
5.2.1	Primärer Luftschall .....	87
5.2.2	Schallfelder .....	89
5.2.3	Luftschallübertragung .....	91
5.3	Luftschalldämmung .....	93
5.3.1	Biegeeweiche isotrope Platten .....	94
5.3.2	Biegesteife isotrope Platten .....	95
5.3.3	Mehrschichtbauteile .....	97
5.3.4	Mehrflächige Systeme .....	100
5.3.5	Transmission durch Leckagen .....	101
5.4	Luftschallabsorption .....	104
5.4.1	Poröse Absorber .....	105
5.4.2	Kammer- und Membran-Absorber .....	107
5.4.3	Mikroperforierte Absorber (MPA) .....	110
5.4.4	Helmholtz-Resonator .....	111
5.5	Schallisoliersysteme im Fahrzeug .....	111
5.5.1	Stirnwand .....	112
5.5.2	Motorkapselung .....	113
5.5.3	Unterbodenverkleidung (UBV) .....	115
5.5.4	Bodengruppe .....	115
5.5.5	Türen und Fenster .....	117
5.6	Schallausbreitung in Räumen .....	118
5.6.1	Raumresonanzen .....	118
5.6.2	Kohärenz von Schallfeldern .....	120
5.6.3	Hörsamkeit .....	121
5.7	Schallausbreitung in Rohren und Kanälen .....	123
5.7.1	Offenes und geschlossenes Rohrende .....	124
5.7.2	T-Abzweigung mit $\lambda/4$ -Rohr .....	125
5.7.3	T-Abzweigung mit Resonator .....	126
5.7.4	Expansionskammer .....	127
5.7.5	Absorptionsschalldämpfer .....	128
5.7.6	Strömungsgeräusche .....	129
<b>6</b>	<b>Körperschall</b> .....	132
6.1	Sekundärschall .....	132
6.1.1	Plattenschwingungen .....	132
6.1.2	Indirekter Luftschall, Kolbenstrahler .....	133
6.1.3	Plattenabstrahlung .....	135
6.2	Körperschallübertragung .....	137
6.2.1	Maschinenakustische Gleichung .....	137
6.2.2	Körperschallimmission .....	139
6.2.3	Mobilitäten elementarer Bauteile .....	140
6.2.4	Dämmung durch Zusatzimpedanz .....	142
6.2.5	Dämmung durch elastische Lagerung .....	143
6.2.6	Dämpfung, Entdröhnung .....	145
6.3	Lagerelemente .....	147



<b>7</b>	<b>Psychoakustik</b>	151
7.1	Das menschliche Hörorgan	151
7.2	Hörbereich	152
7.3	Komplexe Empfindungsgrößen	153
<b>8</b>	<b>Fahrgeräusch</b>	158
8.1	Antriebsgeräusch	158
8.2	Wind- und Rollgeräusch	159
8.2.1	Rollgeräusch	159
8.2.2	Umströmungsgeräusch	160
8.2.3	Wummern	163
8.3	Sound-Design	164
8.3.1	Zielsound	164
8.3.2	Active Noise Control	166
<b>9</b>	<b>Motorgeräusch</b>	171
9.1	Verbrennungsgeräusch	171
9.2	Gas- und Massenkkräfte	173
9.2.1	Motorordnungen	173
9.2.2	Massenkkräfte	173
9.2.3	Gaskräfte	175
9.3	Massenausgleich	177
9.4	Leistungsausgleich	180
9.4.1	Schwungmasse und Torsionsdämpfer	180
9.4.2	Zweimassenschwungrad	182
9.4.3	Weitere Maßnahmen zur Reduktion der Drehungleichförmigkeit	184
9.5	Mechanische Geräusche	185
9.5.1	Kurbeltrieb	186
9.5.2	Ventiltrieb	187
9.5.3	Abgas-Turbolader	187
9.5.4	Kettentrieb	187
9.5.5	Getriebeegeräusche	189
9.6	Aggregatlagerung	190
9.6.1	Lagerkräfte	190
9.6.2	Motor- und Getriebe Lagerung	192
9.6.3	Lagerung Hinterachse	194
<b>10</b>	<b>Ladungswechselgeräusch</b>	198
10.1	Ansauganlage	198
10.1.1	Aufbau	198
10.1.2	Problemstellungen und Entwicklungsziele	199
10.1.3	Simulation	200
10.1.3.1	Akustische Wellenausbreitung im Ansaugtrakt	200
10.1.3.2	Schallabstrahlung der elastischen Strukturen	201
10.1.3.3	Transfermatrixmethode für das Ansaugsystem	202
10.1.4	Akustikmaßnahmen	202
10.1.4.1	Körperschalleintrag	203
10.1.4.2	Oberflächenabstrahlung	203
10.1.4.3	Mündungsschall	203
10.1.4.4	Sounddesign	204
10.1.5	Validierung	205
10.1.5.1	Lautsprecher-Prüfstand	205
10.1.5.2	Dynamische Steifigkeit	206
10.1.5.3	Messungen mit Motoranregungen	207
10.1.5.4	Fahrzeugmessungen	207
10.2	Abgasanlage, Schalldämpfer	207
10.2.1	Funktion und Aufbau	207

10.2.2	Testmethoden .....	210
10.2.3	Komponentenbeitrag zum Abgasgeräusch .....	210
10.2.3.1	Krümmen .....	210
10.2.3.2	Katalysator .....	211
10.2.3.3	Dieselpartikelfilter .....	211
10.2.3.4	Schalldämpfer .....	212
10.2.3.5	Schaltbare Abgasklappe .....	213
10.2.3.6	Aktiver Schalldämpfer (ANC) .....	214
10.2.3.7	Zweiflutige Abgasanlage .....	215
10.2.4	Körperschallemission der Komponenten .....	216
10.2.4.1	Schalldämpfer .....	216
10.2.4.2	Katalysator .....	217
10.2.5	Auswirkung beim Innengeräusch .....	217
10.2.5.1	Prognose des Mündungsanteils .....	217
10.2.5.2	Einfluss Mündungsgeräusch .....	218
10.2.5.3	Einfluss Aufhängung .....	219
10.2.6	Sound Design .....	220
10.2.7	Berechnung der Abgasanlagenakustik .....	221
<b>11</b>	<b>Reifen-Fahrbahngeräusch .....</b>	<b>223</b>
11.1	Reifeneigenschaften .....	223
11.2	Reifeneinfluss auf das Rollgeräusch .....	225
11.2.1	Strukturschall durch Reifenschwingungen .....	226
11.2.1.1	Anregung .....	226
11.2.1.2	Übertragung .....	228
11.2.1.3	Abstrahlung .....	229
11.2.2	Kompressionsgeräusch .....	230
11.2.3	Horneffekt .....	230
11.2.4	Resonanzphänomene .....	230
11.2.5	Zielkonflikte .....	231
11.3	Fahrbahneinfluss auf das Rollgeräusch .....	232
11.4	Rollgeräusch außerhalb des Fahrzeugs .....	234
11.5	Rollgeräusch innerhalb des Fahrzeugs .....	235
11.5.1	Transferpfade ins Fahrzeug .....	235
11.5.2	Geräuschphänomene .....	236
11.5.3	Luftschwingungen im Reifeninnern .....	236
<b>12</b>	<b>Geräusche mechatronischer Systeme .....</b>	<b>239</b>
12.1	Elektrische Stellmotoren .....	239
12.2	Lüfter und Gebläse .....	241
12.3	Fahrzeugklimatisierung .....	243
12.4	Lenkungssystem .....	246
12.4.1	Kavitationsgeräusche .....	247
12.5	Bremssystem .....	248
12.5.1	Regelgeräusche .....	249
12.5.2	Rubbeln .....	249
12.5.3	Quietschen .....	249
12.6	Biegeschlafte Leitungen .....	250
12.7	Hybridantrieb .....	254
<b>13</b>	<b>Störgeräusche .....</b>	<b>256</b>
13.1	Kontaktstellengeräusche .....	256
13.1.1	Anregungsarten .....	257
13.1.2	Stick-Slip-Effekt .....	259
13.1.3	Anschlag-Effekt .....	260
13.1.4	Bewertungs- und Auslegungskriterien .....	262
13.2	Audio-Störgeräusche .....	265

<b>14 Außengeräusch</b>	267
14.1 Standgeräusch	267
14.2 Fahrgeräusche	268
14.2.1 Reifen/Fahrbahngeräusch	269
14.2.2 Antriebsgeräusch	271
14.2.3 Vorbeifahrt nach ISO 362	272
14.3 Akustische Wahrnehmbarkeit	273
14.3.1 Einleitung	273
14.3.2 Relevante Verkehrssituationen	274
14.3.3 Psychoakustische Grundlagen	274
14.3.4 Experimentelle Ermittlung der akustischen Wahrnehmbarkeit	275
14.3.5 Vorhersage der akustischen Wahrnehmbarkeit	276
14.3.6 Beeinflussung durch andere Faktoren	278
14.3.6.1 Gangwahl	278
14.3.6.2 Ablenkung	278
14.3.6.3 Binaurale Faktoren	279
<b>15 Berechnung und Simulation</b>	280
15.1 Mehrkörpersimulation (MKS)	280
15.2 Struktur-Optimierung	281
15.3 Akustik-Berechnung (FEM)	283
15.3.1 Modale Gleichungen	284
15.3.2 Äquivalente abgestrahlte Schallleistung	285
15.4 Boundary Element Methode (BEM)	286
15.5 Statistische Energieanalyse (SEA)	288
15.6 Aeroakustik-Berechnung (CAA)	290
15.6.1 Navier-Stokes-Gleichungen	291
15.6.2 Lattice-Boltzmann-Methode	292
15.7 Substrukturtechnik	293
15.7.1 Methodische Grundlagen	293
15.7.2 EMPC-Methode	295
15.7.3 Identifikation von Betriebsanregungen	296
<b>16 Messverfahren</b>	299
16.1 Binaurale Messtechnik	299
16.2 Ortung von Schallquellen	300
16.2.1 Intensitätssonde	300
16.2.2 Akustische Nahfeldholografie	301
16.2.3 Akustische Fernfeldholografie	302
16.3 Akustische Systemidentifikation	304
16.3.1 Übertragungsfunktionen	304
16.3.2 Impulshammermethode	304
16.4 Transferpfadanalyse (TPA)	306
16.4.1 Rechnerische Luftschall-TPA	307
16.4.2 experimentelle Körperschall-TPA	309
16.4.3 Experimentelle Luftschall-TPA	309
16.5 Modalanalyse und -synthese	310
16.5.1 Modalzerlegung	310
16.5.2 Experimentelle Modalanalyse	311
16.6 Betriebsschwingungsanalyse	313
16.6.1 Laser-Scanning-Vibrometrie	313
16.6.2 Speckle-Interferometrie	314
<b>17 Vibroakustische Messtechnik</b>	316
17.1 Einsatzbereiche	316
17.1.1 Technisches Umfeld	316
17.1.2 Messabläufe	317

17.2	Vibroakustische Sensoren.....	318
17.2.1	Beschleunigungssensor .....	319
17.2.2	Messmikrofon .....	320
17.2.3	Laservibrometer .....	321
17.3	Signalverarbeitung.....	322
17.3.1	Kalibrierung .....	322
17.3.2	Signalkonditionierung .....	322
17.3.3	Drehzahlerfassung .....	323
17.3.4	Ergänzende Messgrößen .....	324
17.4	Analyse-Methoden .....	325
17.4.1	Frequenzanalysen.....	325
17.4.2	Ordnungsanalysen .....	327
17.4.3	Ordnungsfilterung im Motorenbau.....	327
17.4.4	Grad-Kurbelwinkel-Analyse .....	328
17.4.5	Drehschwingungsanalyse .....	329
17.4.6	Hauptkomponentenanalyse .....	329
17.4.7	Mehrdimensionale Ergebnisdarstellung .....	331
17.5	Audio-Synthese, Auralisierung .....	331
17.5.1	Geräusch-Synthese .....	332
<b>18</b>	<b>Vibroakustische Prüftechnik .....</b>	<b>335</b>
18.1	Dynamischer Motorprüfstand.....	335
18.2	Freifeldraum .....	335
18.3	Hallraum .....	336
18.4	Fenster-Prüfstand.....	339
<b>19</b>	<b>Anlagen .....</b>	<b>341</b>
<b>20</b>	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>342</b>